



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
VASA YRKESHÖGSKOLA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Alexsi Hirvilampi

# DC-JAKELUYKSIKKÖ

DC sähkönjakelu konesaleissa

Tekniikka ja liikenne  
2013

## **ALKUSANAT**

Työ DC-jakeluyksiköstä tehtiin ABB:n Low Voltage Systems – yksikölle keväällä 2013. Tahdon kiittää ABB:n insinööri Jarno Salmea sekä Vaasan ammattikorkeakoulun yliopettajaa Vesa Verkkosta kaikesta avusta ja opastuksesta jota työssäni tarvitsin. Suuren kiitoksen ansaitsee myös avovaimoni Jutta-Kaisa, joka kärsivällisesti jaksoi tukea minua työn aikana.

Vaasassa 8.5.2013

Aleksi Hirvilampi

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Alexi Hirvilampi
Opinnäytetyön nimi	DC-jakeluyksikkö
Vuosi	2013
Kieli	suomi
Sivumäärä	50
Ohjaaja	Vesa Verkkonen

---

Opinnäytetyön lähtökohtana toimi datakeskusten jatkuvasti kasvava määrä sekä yleisesti lisääntynyt energiatehokkuuden arvostus. Työn tarkoituksena oli selvittää tasavirtajakelun eroja vaihtovirralla suoritettuun jakeluun sekä suunnitella jakeluyksikön prototyyppi.

Tasa- ja vaihtovirralla suoritettujen tehonsiirron eroja tutkittiin sekä tilankäytön puolesta saavutettavien erojen että johtimissa tapahtuvien jännite- ja tehohäviöiden mukaan. Prototyypin suunnittelussa etsittiin tasavirralla soveltuvia komponentteja sekä tehtiin ohjeistus prototyypin valmistamisesta.

Tasavirralla suoritettu pienjännitejakelu osoittautui siirtohäviöiden puolesta yksivaiheista vaihtojännitejakelua tehokkaammaksi vaihtoehdoksi. Kolmivaiheiseen vaihtojännitejakeluun verrattaessa tasavirran edut eivät olleet itsestään selviä, vaan edut tulivat ilmi vasta ääritapauksissa. Datakeskuksissa suurin osa sähköenergiaa kuluttavista laitteista tarvitsevat kuitenkin yksivaiheisen syötön, jolloin siirtyminen tasavirtajakeluun on kannattavaa. Prototyypin suunnittelussa ongelmaksi muodostui tasavirtakäyttöön tarkoitettujen komponenttien vähyys. Osa komponenteista on kuitenkin hyväksytty vaihtovirran lisäksi myös tasavirralla, tietyt rajoitukset huomioon ottaen.

## ABSTRACT

Author	Aleksi Hirvilampi
Title	DC Power Distribution Unit for Data Centers
Year	2013
Language	Finnish
Pages	50
Name of Supervisor	Vesa Verkkonen

---

The purpose of this thesis was to compare direct current and alternative current in the low voltage distribution of data centers. Because the number of data centers is growing fast and the valuation of energy efficiency is high, lowering the power losses in data centers is in great value.

The differences of alternating current and direct current were compared by benefits of space usage and comparing the differences in voltage and power losses. A part of the thesis was to develop the prototype of direct current distribution for Power Distribution Unit and search components that are suitable for the direct current use.

Direct current distribution has advantages compared to one phase alternating current, but compared to three phase alternating current, the benefits of direct current were found only in ultimate cases. Because the servers mostly use one phase power supply, changing from alternating current to direct current is a good option. Difficulties with the prototype were mostly the low amount of components meant to use in direct current usage. Some of the components meant to use with alternating current can also be used in the direct current system, with some limitations.

---

Keywords	direct current, data center, power distribution, power loss
----------	---

## SISÄLLYS

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

1	JOHDANTO .....	7
2	ABB OY .....	8
3	PDU YLEISESTI .....	9
4	AC-JA DC-JAKELUJEN VERTAILU KONESALEISSA .....	10
	4.1 Tarvittavat laitteistot .....	10
	4.2 Saavutettavat säästöt .....	12
	4.3 Jännite-ja tehohäviöiden vertailu .....	13
	4.4 Sähkönjakelujärjestelmän luotettavuus.....	20
5	DC-JAKELUA VARTEN MCS-RUNKOON VALMISTETTU PDU .....	22
	5.1 PDU:n kalustus .....	22
	5.1.1 Runko .....	22
	5.1.2 Etukoje .....	23
	5.1.3 Johdonsuojakatkaisijat .....	27
	5.1.4 Mittauslaitteisto.....	31
	5.2 Edut verrattuna MNS runkoon.....	32
6	MITTAUKSET.....	34
	6.1 Tarvittavat mittaukset .....	34
	6.2 Mittauslaitteisto.....	35
	6.3 Toimintakuvaus ohjelmoitavalle logiikalle.....	36
7	PROTOTYYPIN VALMISTUS .....	37
8	MARKKINOINTIMATERIAALI .....	41
	8.1 Esitteen suunnittelu .....	41
	8.2 Kustannuslaskenta Excel/ohjelma .....	41
9	UUSIUTUVIEN ENERGIALÄHTEIDEN KÄYTTÖ KONESALEISSA....	43
	9.1 Liitettävyys DC/DC -muuntajalla.....	46
	9.2 Liitettävyys DC/AC -suuntaajalla.....	47
10	YHTEENVETO .....	48

LÄHTEET.....	49
--------------	----

## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> AC-jännitteinen sähkönjakelu /3/.	10
<b>Kuva 2.</b> DC-jännitteinen sähkönjakelu /3/.	11
<b>Kuva 3.</b> Jännitteenalenema prosentteina verrattaessa yksivaiheista DC- ja AC-järjestelmää kaapeleiden X/R-suhteen funktiona eri tehokertoimilla kuparijohtimilla oletuksena että $I_{DC}=I_P$ , $U_{DC}=U_{AC}$ .	16
<b>Kuva 4.</b> Jännitteenalenema prosentteina verrattaessa yksivaiheista DC- ja AC-järjestelmää kaapeleiden X/R-suhteen funktiona eri tehokertoimilla alumiinijohtimilla oletuksena että $I_{DC}=I_P$ , $U_{DC}=U_{AC}$ .	17
<b>Kuva 5.</b> Jännitteenalenema prosentteina verrattaessa kolmivaiheista DC- ja AC-järjestelmää kaapeleiden X/R-suhteen funktiona eri tehokertoimilla alumiinijohtimilla oletuksena että $I_{DC}=I_P$ , $U_{DC}=U_{AC}$ .	18
<b>Kuva 6.</b> Pätötehohäviöiden ero prosenteissa verrattaessa vaihtovirtajärjestelmää tasavirtajärjestelmään tehokertoimen funktiona oletuksena että $I_{DC}=I_P$ , $U_{DC}=U_{AC}$ .	19
<b>Kuva 7.</b> Katkaisijan 3-napainen kytkentä /9/.	25
<b>Kuva 8.</b> Katkaisijan 4-napainen kytkentä /9/.	26
<b>Kuva 9.</b> Laukaisukäyrä K /2/.	30
<b>Kuva 10.</b> Laukaisukäyrä Z /2/.	31
<b>Kuva 11.</b> Virran mittausta ajan funktiona /1/.	36
<b>Kuva 12.</b> PDU:n layout-kuva.	37
<b>Kuva 13.</b> 24 VDC syötön piirikaavio.	39
<b>Kuva 14.</b> PDU:n piirikaavio.	40
<b>Kuva 15.</b> Paneelin teho lämpötilan funktiona, kun nimellisteho saavutetaan lämpötilassa 25 °C /18/.	44
<b>Kuva 16.</b> Aurinkopaneelin antama virta ja jännitekäyrä eri säteilyvoimakkuuksilla /17/.	45
<b>Kuva 17.</b> Hakkurimuuntajan yksinkertaistettu kytkentä /16/.	46
<b>Kuva 18.</b> Vaihtosuuntaajan syöttämä virta sekä jännite /10/.	47

<b>Taulukko 1.</b> Kaapeleiden likimääräisiä resistansseja sekä reaktansseja /11/. ....	15
<b>Taulukko 2.</b> XT-sarjan katkaisijoiden teknisiä arvoja /9/.....	27
<b>Taulukko 3.</b> Johdonsuojakatkaisijoiden teknisiä arvoja /2/.....	28
<b>Taulukko 4.</b> MNS-runkojen mitat /8/. ....	32
<b>Taulukko 5.</b> MCS-runkojen mitat /7/.....	32
<b>Taulukko 6.</b> Kojeistojen virtarajat /8/, /9/.....	33
<b>Taulukko 7.</b> CMS-anturien tarkkuuksia /1/. ....	35



## SYMBOLIT JA LYHENTEET

### Symbolit

$I_k$	oikosulkuvirta (A)
$I_n$	nimellisvirta (A)
$I_{cw}$	terminen 1 sekunnin nimelliskestovirta (A)
$I_{cf}$	ehdollinen oikosulkuvirta (A)
$I_{pk}$	dynaaminen nimelliskestovirta (A)
$I_p$	pätövirta (A)
$I_q$	loisvirta (A)
$P$	pätöteho (W)
$P_h$	pätötehohäviö (W)
$U_{AC}$	vaihtojännite (V)
$U_{DC}$	tasajännite (V)
$f$	taajuus (Hz)
$R$	resistanssi ( $\Omega$ )
$X$	reaktanssi ( $\Omega$ )
$\varphi$	virta- ja jänniteaallon välinen kulmaero

### Lyhenteet

PDU	(Power Distribution Unit) sähköjakeluyksikkö
MDB	(Main Distribution Board) pääkojeisto

DC	(Direct Current) tasavirta
AC	(Alternative Current) vaihtovirta
UPS	(Uninterruptible Power Supply) varatehonlähde
MPP	(Maximum Power Point) maksimi tehopiste

## 1 JOHDANTO

Verkkoliikenteen ja pilvitallennustilan lisääntyneen käytön vuoksi myös datakeskusten ja niiden laitteistojen määrä nousee kiihtyvällä tahdilla. Datakeskukset tuottavat tällä hetkellä 2 % koko maailman hiilidioksidipäästöistä, ja energian kulutus niissä on lähes täysin sähköenergiaa, joten laitteistojen energiatehokkuuden parantaminen tulee nousemaan suureksi tekijäksi lähitulevaisuudessa.

Työssä tarkastellaan tasajännitteen käyttöä datakeskusten sähkönjakelussa, verrataan saavutettavia hyötyjä vaihtojännitteellä suoritettavaan jakeluun sekä suunnitellaan tasajännitteelle soveltuva jakeluyksikkö. Lisäksi työssä tarkastellaan uusiutuvien energialähteiden, varsinkin aurinkovoiman, liittämistä tasajännitejakeluun.

Vaihtojännite syrjäytti tasajännitteen jännitetasojen muunnon helppouden sekä pyörivien sähkökoneiden, kuten generaattorien ja kolmivaihemoottorien käytön yleistyttyä, mutta edullinen ja nykyaikainen tehoelektroniikka sekä energiatehokkuuden noussut arvostus painostaa siirtymään takaisin siirtohäviöiltään edullisempaan tasajännitteeseen sähkönsiirtoon. Pitkät sähköenergian siirtomatkat sekä uusiutuvat energianlähteet, kuten tasajännitettä tuottavat aurinkovoimalat sekä polttokennot ajavat yritykset tutkimaan tarkemmin tasajännitteen hyödyntämistä sähkönjakelussa.

Työ tehdään ABB:n Low Voltage Systems – yksikölle, joka vastaa ABB:n älykkäistä kojeistoista sekä pienjännitesähkönjakelulaitteistoista.

## 2 ABB OY

ABB muodostettiin vuoden 1988 tammikuussa, kun ruotsalainen Asea ja sveitsiläinen Brown Boveri fuusioituivat. Yrityksen historia ulottuu vuoteen 1889, jolloin Gottfrid Strömberg perusti sähköliikkeen. Jo vuonna 1926 Strömberg aloitti yhteistyön Brown Boverin kanssa, sekä vuonna 1928 Asea hankki omistukseensa 60 % Strömbergin osakkeista. Vaasaan tehdastoiminta siirtyi sodan jälkeen vuonna 1944, kun tehdasalue haluttiin mahdollisimman kauas Neuvostoliiton rajasta pommitusten pelossa.

Vuonna 2011 ABB työllisti maailmanlaajuisesti noin 134 000 työntekijää liikevaihdon ollessa noin 38 miljardia euroa. Suomessa yritys työllisti keskimäärin 6800 henkilöä ja liikevaihto oli 2348 M€. ABB Oy toimii Suomessa yli 30 paikakunnalla, joista tehdaskeskittymät sijaitsevat Vaasassa, Helsingissä ja Porvoossa /5/.

ABB Oy:llä on Suomessa 5 ydinliiketoimintaa /6/:

- Sähkövoimatuotteet, joka vastaa sähköasemien toimituksista sekä sähköverkkojen valvontajärjestelmistä.
- Sähkövoimajärjestelmät, joka toimittaa keskijännitekomponentteja sekä muuntajia.
- Sähkökäytöt ja kappaletavara-automaatio, jonka vastuualueena on pien- sekä keskijännitetaajuusmuuttajat, moottorit, generaattorit sekä robotit.
- Prosessiautomaatio, joka toimittaa sähköistysprojekteja tehtaille sekä laivoihin.
- Pienjännitetuotteet, joka valmistaa katkaisimia, kytkimiä, älykkäitä kojeistoja sekä moottorinohjaimia.

### **3 PDU YLEISESTI**

PDU eli Power Distribution Unit on kriittiseen sähkönjakeluun suunniteltu älykäs tehonjakelukojeisto. PDU:lle syöttö tuodaan MDB:ltä eli Main Distribution Boardilta ja PDU:lla virta jaetaan pienempiin osiin sitä tarvitseville laitteille. Yhteen MDB:hen voidaan liittää useita PDU-yksiköitä ja PDU:lla voidaan syöttää useita kuormia lähtöjen määrästä sekä mitoitusvirrasta riippuen. PDU:n käyttökohteita ovat konesalit, kiinteistöjen palvelintilat, sairaalat, laivat sekä muut luotettavaa pienjännitesähkönjakelua vaativat kohteet.

PDU sisältää yleensä etukojeen, jolla kojeisto voidaan erottaa muusta järjestelmästä vian sattuessa tai huoltotöitä tehtäessä, johdonsuojakatkaisijat, joilla virta jaetaan pienempiin osiin kuormille sekä sähkön tehon sekä sähkön laadun mittauslaitteistot, jolloin sähkön kulutusta sekä laatua pystytään valvomaan tarkasti ja vikojen paikallistaminen helpottuu.

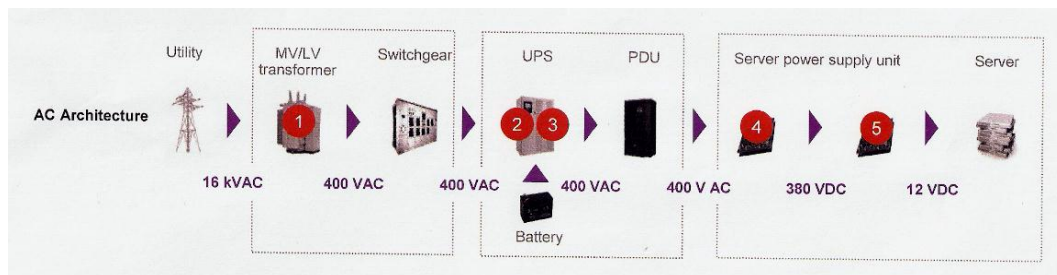
## 4 AC-JA DC-JAKELUJEN VERTAILU KONESALEISSA

Datakeskuksen sähköteho voi olla jopa 10 MW ja datakeskusten yhteinen sähköteho maailmanlaajuisesti on jopa 80 TW lisääntyen jatkuvasti. Koska konesalien tuottamat päästöt ovat lähes 2 % maailman laajuisista CO<sub>2</sub>-päästöistä, on niiden energiatehokkuuden parantaminen nousemassa suureksi tekijäksi sähkötekniikan alalla /3/.

Energiatehokkuutta voidaan parantaa siirtohäviöitä pienentämällä tai laitteiden hyötysuhteita parantamalla. Koska elektroniset laitteet tarvitsevat tasajännitettä, on loogista hoitaa jo jakelu tasajännitteellä, jolloin saadaan vähennettyä komponenttien määrää järjestelmässä. Myös siirtohäviöt ovat tasajännitteellä pienemmät verrattaessa vaihtojännitteeseen, joten jo tämänkin puolesta tasajännitteen käyttöä pienjännitejakelussa on syytä tutkia.

### 4.1 Tarvittavat laitteistot

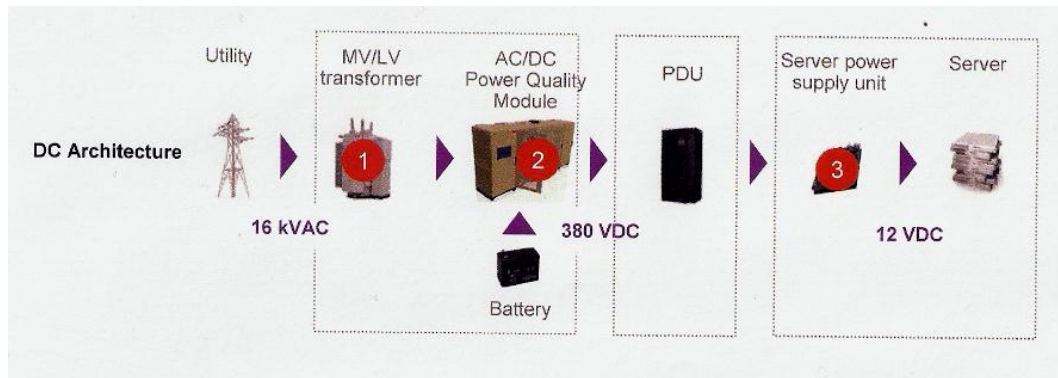
Osa säästöistä siirryttäessä vaihtovirrasta tasavirran jakeluun syntyy tarvittavien laitteiden määrän laskusta. Koska jakelujärjestelmässä tarvittavia laitteita on vähemmän, syntyy säästöjä myös järjestelmän parantuneen hyötysuhteen johdosta, koska energiaa lämpöhäviöiksi tuottavia laitteita on vähemmän.



**Kuva 1.** AC-jännitteinen sähkönjakelu /3/.

Kuvassa 1 on esitetty sähkönjakelun matka keskijänniteverkosta datakeskuksen serverin keskusyksikölle asti. Jännite muunnetaan ensin keskijännitteestä pienjännite-

nitteeksi, jonka jälkeen se johdetaan UPS-yksikön kautta PDU:lle ja sieltä edelleen keskusyksikön virtalähteelle.



**Kuva 2.** DC-jännitteinen sähkönjakelu /3/.

Kuvassa 2 esitettyssä DC-sähkönjakelussa keskijännite johdetaan muuntajalle, jolla jännite muunnetaan pienjännitteeksi. Tämän jälkeen jännite tasasuunnataan ja tasasuuntaaja sisältää yleensä myös UPS-akuston, jolla datakeskus toimii sähkökatkosten aikana. Suuntaajalta jännite johdetaan PDU-yksiköille, jotka hoitavat jakelun edelleen keskusyksiköiden DC/DC jännitemuuntajille.

Komponenteista saadaan pois erillinen UPS-yksikkö sekä keskusyksikön AC/DC muunnin. Varsinkin UPS-yksikön pois jättäminen vähentää häviöitä, koska vaihtojännite on tasasuunnattava akustoja varten ja edelleen vaihtosuunnattava sähkönjakeluun. DC-jakelussa erillistä UPS yksikköä ei tarvita, vaan oikein mitoitettu akusto saadaan kytkettyä suoraan jakelujärjestelmään. Keskusyksikön virtalähteen toiminnasta johtuen vaihtojännite tasasuunnataan ja vasta tämän jälkeen jännite pienennetään DC/DC muuntimella. Siirryttäessä AC-jakelusta DC-jakeluun päästään eroon kolmesta suuntaajasta: UPS-yksikössä kahdesta ja virtalähteessä yhdestä. Suuntaajissa käytettävissä puolijohteissa tapahtuu aina häviöitä, joten järjestelmän hyötysuhdetta voidaan nostaa merkittävästi /3/.

## 4.2 Saavutettavat säästöt

Tasajännitteelle suunnitellut komponentit ja laitteet ovat usein vaihtojännitekomponentteja kalliimpia DC-järjestelmien vähäisen määrän vuoksi. Lisäksi suuntaajissa käytettyjen puolijohdekomponenttien eliniät ovat jatkuvassa käytössä lyhyet, noin 5-10 vuotta. Verrattaessa muuntajien jopa yli 30 vuoden käyttöikään tekee laitteiden tiheä uusimis- ja huoltoväli suuren lisän järjestelmän käyttökuluihin. Suuntaajista päästään kuitenkin eroon UPS-yksiköissä, sekä palvelimien virtalähteissä, joissa puolijohdeiden eliniät ovat samaa luokkaa ja useiden suuntaajien huollon ja vaihdon sijaan selvittää yhden ison suuntaajan huoltotöillä. Laitteistot kuitenkin kehittyvät jatkuvasti ja 15 vuoden käyttöikä suuntaajille on hyvinkin mahdollinen. /19/.

Tarvittavien laitteiden vähäisen määrän vuoksi voidaan kuitenkin saavuttaa jopa 15 % säästö rakennettaessa jakelujärjestelmä tasajännitteelle vaihtojännitteen sijaan. Säästöjä syntyy pääosin laitteiden vähäisemmän hankintamäärän vuoksi joko suoraan tai epäsuoraan. Koska järjestelmässä selvittää vähäisemmällä laitemäärällä, on laitteiston hankintahinta alhaisempi. Vähemmän laitteita tarkoittaa myös tilan säästöjä ja DC-jakelun tilansäästö AC-jakeluun verrattuna on jopa 25 %, jolloin selvittää pienemmällä ja halvemmalla rakennuksella tai rakennukseen mahtuu suurempi määrä servereitä. Laitteiston vähäisempi määrä aiheuttaa myös pienemmät asennuskustannukset, jotka ovat suuri tekijä rakennettaessa uutta datakeskusta /3/.

Vaihtovirtajärjestelmään verrattuna tasavirtajärjestelmä tarvitsee jakeluyksiköissä hieman enemmän tilaa johtolähtöä kohden, koska järjestelmässä on suojattava sekä positiivinen että negatiivinen johdin. Suojauksen helpottamiseksi jännitetaso on +190/-190 VDC, jolloin maata vasten tapahtuva oikosulku on helpompi katkaista ja johdinten välisessä oikosulkutilanteessa suojaamassa on kaksi johdon-suojakatkaisijaa ja siten kaksi ilmväliä /2/.



### 4.3 Jännite- ja tehohäviöiden vertailu

Rakennusvaiheessa saavutetut säästöt ovat ABB:n rakentamista kohteista saatuja kokemukseräisiä arvoja, joita on vaikea analysoida ilman tarkempia tietoja, joten tässä työssä keskitytään tarkemmin sähkön siirrossa tapahtuviin säästöihin. Tasajännitteen jännitehäviöt ovat vaihtojännitettä pienemmät, koska tasajännitteeseen vaikuttaa vain johtimen resistanssi ja vaihtojännitteeseen lisäksi johtimen reaktanssi, kuten kaavoista 1 ja 2 nähdään. /12/.

$$\Delta u_{AC} = I^2 * l * (r * \cos \varphi + x * \sin \varphi) = (I_p * r + I_q * x) * 2 * l \quad (1)$$

$$\Delta u_{DC} = I^2 * l * r \quad (2)$$

Kaavat 1 ja 2 koskevat tasajännitettä sekä yksivaiheista vaihtojännitettä, symmetrisessä kolmivaiheisessa siirrossa paluujohdinta ei tarvitse huomioida jännitteenalenemassa kuten yksivaiheisessa tapauksessa. Koska teho on virran ja jännitteen tulo, tarkoittaa korkeampi jännite pienempää virtaa ja siten pienempää jännitteenalenemaa. Pienjännite rajat ovat Suomessa 1000 VAC ja 1500 VDC, joten tasajännite mahdollistaa tämänkin puolesta suuremman tehonsiirron ilman suurjännitteisiä komponentteja. Datakeskuksissa on kuitenkin yleistynyt jännitetaso 380 VDC (+/- 190 VDC) jonka useat komponenttivalmistajat ovat ottaneet käyttöön, johtuen USA:n jännitetasoista ja sen hallitsemasta suuresta markkina-alueesta /3/.

$$\Delta u \% = \frac{\Delta u_{AC} - \Delta u_{DC}}{\Delta u_{DC}} * 100 \% \quad (3)$$

$$\Delta u \% = \frac{I_p * r + I_q * x - I_{DC} * r}{I_{DC} * r} * 100 \% \quad (4)$$

Verrattaessa jännitteenalenemaa DC- ja AC-järjestelmien välillä kannattaa muodostaa kaavoista 1, 2 ja 3 kaava 4, jolloin jännitteenaleneman eroa voidaan tutkia

prosentuaalisena erona. Laskuissa on oletuksena että  $I_{DC}$  ja  $I_P$  ovat samansuuruiset, jolloin kaapelia pitkin johdetaan sama pätövirta.

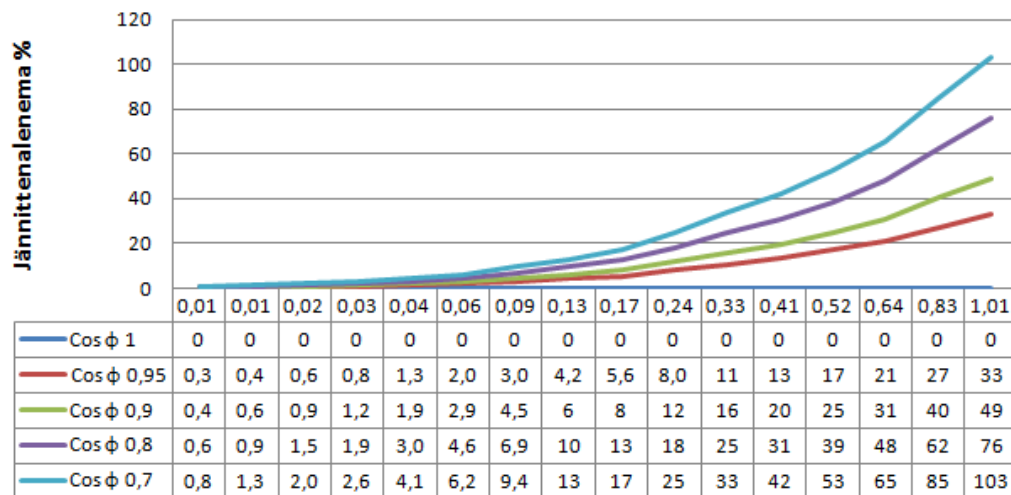
Taulukossa 1 on esitetty likimääräisiä arvoja kaapeleiden resistansseista ja reaktansseista sekä kaapeleiden  $X/R$ -suhteet. Taulukon 1 ja kaavojen 3 ja 4 perusteella erot jännitteenalenemassa ovat tasajännitteen hyväksi vasta suurilla virroilla ja kaapeleilla. Esimerkiksi johtimen poikkipinta-alalla  $300 \text{ mm}^2$ , on kaapelin reaktanssilla jopa suurempi vaikutus jännitteenalenemaan, kuin resistanssilla. Näin ollen erittäin suurilla virroilla ja kaapeleilla, kuten  $300 \text{ mm}^2$ , saadaan jännitteenalenema jopa puolitettua käyttämällä tasavirtaa vaihtovirran sijaan. Tarkempia arvoja saadaan suoraan kaapeleiden valmistajilta [11].

**Taulukko 1.** Kaapeleiden likimääräisiä resistansseja sekä reaktansseja /11/.

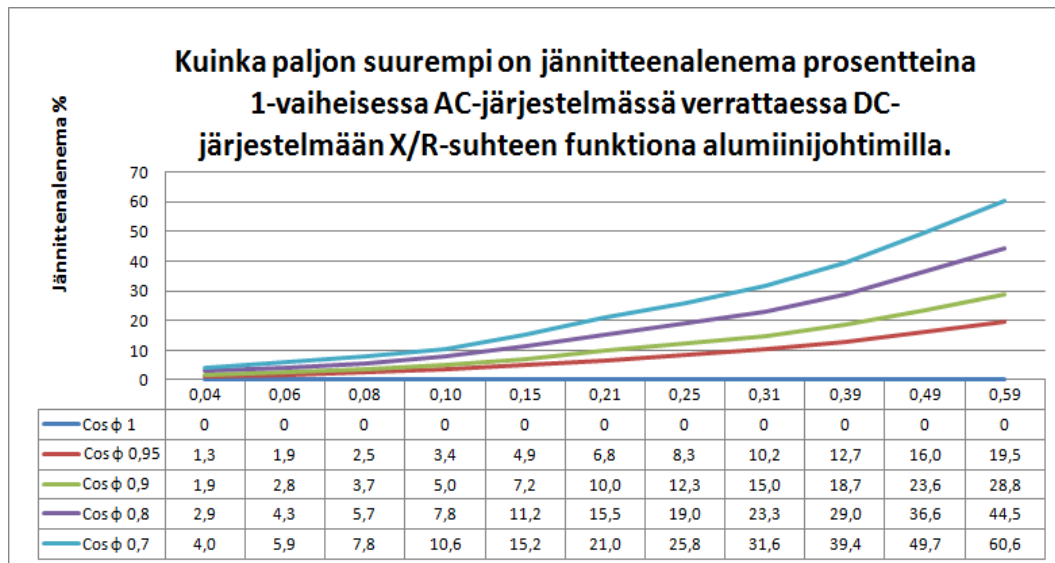
	Kupari			Alumiini		
Johtimen poikkipinta A/mm <sup>2</sup>	Resistanssi Ω/km	Reaktanssi Ω/km	X/R	Resistanssi Ω/km	Reaktanssi Ω/km	X/R
4 x 1,5	14,620	0,115	0,01			
4 x 2,5	8,770	0,110	0,01			
4 x 4	5,480	0,107	0,02			
4 x 6	3,660	0,094	0,03			
4 x 10	2,244	0,090	0,04			
4 x 16	1,415	0,086	0,06	2,324	0,090	0,039
4 x 25	0,898	0,083	0,09	1,489	0,086	0,058
4 x 35	0,652	0,083	0,13	1,086	0,083	0,076
4 x 50	0,482	0,082	0,17	0,796	0,083	0,104
4 x 70	0,336	0,082	0,24	0,551	0,082	0,149
4 x 95	0,244	0,080	0,33	0,398	0,082	0,206
4 x 120	0,195	0,080	0,41	0,316	0,080	0,253
4 x 150	0,155	0,080	0,52	0,258	0,080	0,310
4 x 185	0,125	0,080	0,64	0,207	0,080	0,386
4 x 240	0,095	0,079	0,83	0,162	0,079	0,488
4 x 300	0,078	0,079	1,01	0,133	0,079	0,594

Kuvista 3 ja 4 on esitetty jännitteenalenema kaavan 4 mukaan taulukon 1 kaapeleilla. Kuvista näemme kuinka paljon suurempi on jännitteenalenema yksivaiheisella vaihtovirralla verrattuna tasavirtaan. Tehokertoimen ollessa 1, jolloin syötetty kuorma on täysin resistiivistä tai tilanteessa jossa johtimien poikkipinta-alat ovat hyvin pieniä myös X/R-suhteen ollessa pieni, ei eroa jännitteenalenemassa juurikaan tapahdu, mutta siirrettäessä paljon loistehoa suuren halkaisijan kaapelissa, muuttuu tilanne radikaalisti DC-järjestelmän eduksi. Tarkasteltavat vertailut ovat yleispäteviä ja oletuksena on että siirrettävät pätövirrat sekä nimellisjännitteet ovat samat.

**Kuinka paljon suurempi on jännitteenalenema prosentteina 1-vaiheisessa AC-järjestelmässä verrattaessa DC-järjestelmään X/R-suhteen funktiona kuparijohtimilla.**

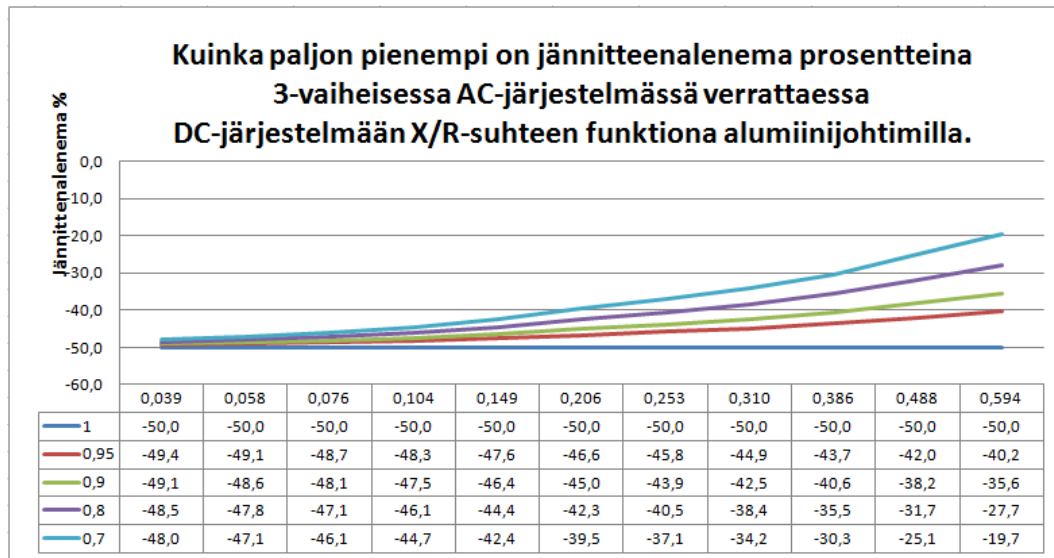


**Kuva 3.** Jännitteenalenema prosentteina verrattaessa yksivaiheista DC- ja AC-järjestelmää kaapeleiden X/R-suhteen funktiona eri tehokertoimilla kuparijohtimilla oletuksena että  $I_{DC}=I_P$ ,  $U_{DC}=U_{AC}$ .



**Kuva 4.** Jännitteenalenema prosentteina verrattaessa yksivaiheista DC- ja AC-järjestelmää kaapeleiden X/R-suhteen funktiona eri tehokertoimilla alumiinijohtimilla oletuksena että  $I_{DC}=I_P$ ,  $U_{DC}=U_{AC}$ .

Verrattaessa 3-vaihejärjestelmää DC-järjestelmään, muuttuu tilanne täysin kuvan 5 mukaan. Siirrettäessä sama pätövirta johdinta pitkin muuttuu tilanne 3-vaiheisen vaihtovirran tehonsiirron eduksi, koska symmetrisen järjestelmän paluujohdinta ei tarvitse ottaa huomioon. Tämän vuoksi jännitehäviö on kaksinkertainen yksivaihe- sekä DC-järjestelmässä. Tällöin hyötyä tapahtuu vasta siirrettäessä erittäin paljon loistehoa sekä suurilla kaapelinhalkaisijoilla, jolloin X/R-suhde on suurempi.



**Kuva 5.** Jännitteenalenema prosentteina verrattaessa kolmivaiheista DC- ja AC-järjestelmää kaapeleiden X/R-suhteen funktiona eri tehokertoimilla alumiinijohtimilla oletuksena että  $I_{DC}=I_P$ ,  $U_{DC}=U_{AC}$ .

Pätötehohäviö on kaavan 5 mukaisesti riippuvainen pätövirrasta  $I_P$  sekä loisivirrasta  $I_Q$  ja johtimen resistanssista  $r$ . Laskuissa oletuksena on, että siirrettävä pätöteho on sama siirtotavasta riippumatta, jolloin yksivaiheisella ja tasavirralla suoritettuun tehonsiirtoon tarvitaan 3 johdinparia jotta päästään siirtämään sama pätöteho samoilla johdinkohtaisilla virroilla.

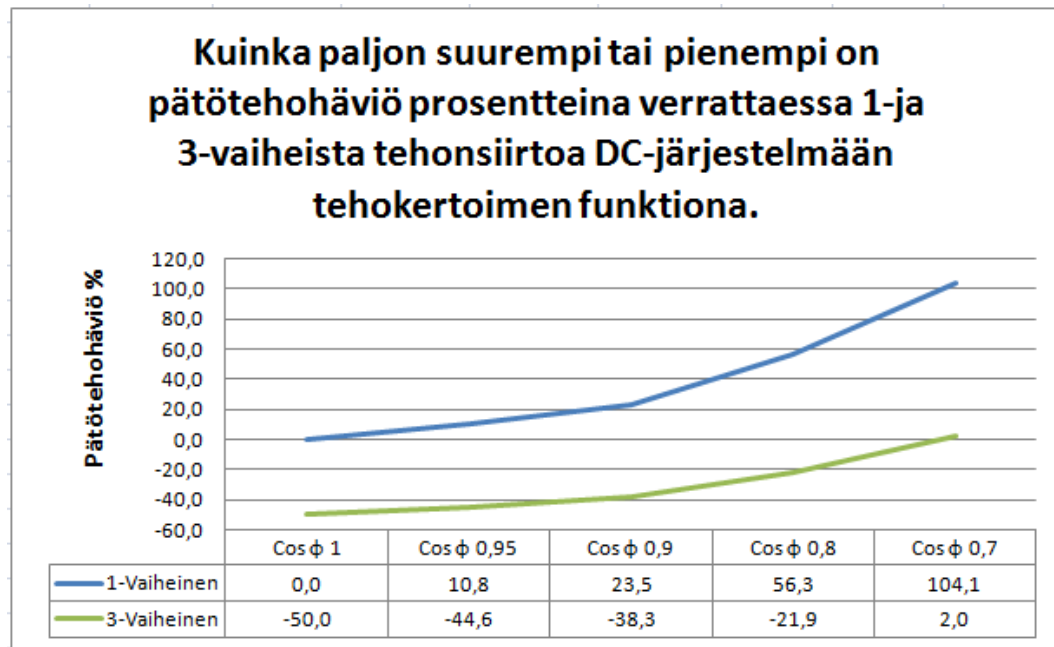
$$P_{hAC} = I_P^2 * r * 2 + I_Q^2 * r * 2 \quad (5)$$

$$P_{hDC} = I_{DC}^2 * 2 * r \quad (6)$$

$$P_{hAC3V} = I_P^2 * r * 3 + I_Q^2 * r * 3 \quad (7)$$

$$P_h \% = \frac{P_{AC} - P_{DC}}{P_{DC}} * 100\% \quad (8)$$

Kaavoilla 5, 6 ja 7 tehdyllä kuvaajalla 6 saatiin laskettua ero prosenteissa siirtohäviöissä verrattaessa 1-ja 3-vaiheista vaihtovirtatehonsiirtoa tasavirtatehonsiirtoon.



**Kuva 6.** Pätötehohäviöiden ero prosenteissa verrattaessa vaihtovirtajärjestelmää tasavirtajärjestelmään tehokertoimen funktiona oletuksena että  $I_{DC}=I_P$ ,  $U_{DC}=U_{AC}$ .

Kuten jännitteenalenemaa tutkittaessa, myös tehohäviöissä ei yksivaiheisella vaihtovirralla ja tasavirralla ole eroa jos tehokerroin on yksi. Verrattaessa tasavirtajärjestelmään, on 1-vaiheisella vaihtovirralla tapahtuvalla tehonsiirrolla pätötehohäviö tehokertoimella  $\cos \phi = 0,95$  jo 9,7 %. 3-vaiheisella tehonsiirrolla etu tasavirran hyväksi tulee esiin vasta siirrettäessä erittäin paljon loistehoa.

Lisäksi tehohäviöitä sekä jännitteenalenemaa syntyy johdonsuojakatkaisijoissa, koska DC-järjestelmässä on oltava suojaus sekä positiiviselle että negatiiviselle johtimelle. Vaihtojännitejärjestelmässä riittää 1 johdonsuoja vaihejohdinta kohti.

Liitteessä 1 tarkastellaan markkinoilla olevan HP:n valmistaman serverin virtalähteen tehokertoimilla eroja jännitteenalenemassa verrattaessa tasavirralla suorit-

tua jakelua vaihtojännitteiseen jakeluun. Nimellisellä kuormituksella tehokerroin on 0,982 ja 50 % nimellisestä tehosta 0,956. Tarkasteluissa on otettu huomioon myös jännitetasot, joka tasavirralla on 380 VDC ja vaihtovirralla 230 VAC, koska syöttöjännite markkinoilla oleville serverien virtalähteille on yleisesti 100 – 240 VAC /15/.

Erot todellisilla jännitetasoilla korostavat DC-järjestelmän paremmuutta, koska korkeammalla jännitteellä voidaan siirtää sama teho pienemmällä virralla. Vaikka loisivirran määrä on nimellisellä teholla erittäin vähäinen, korkeampi jännitetaso puoltaa DC-järjestelmän käyttöä. Säästöjä syntyy jännitteenaleneman lisäksi kaapeloinnista, koska vaihtojännitteellä on joissakin tapauksissa käytettävä suurempaa johtimen poikkipinta-alaa suuremmasta virrasta johtuen.

#### **4.4 Sähkönjakelujärjestelmän luotettavuus**

Järjestelmän luotettavuus paranee jo siitäkin syystä, että järjestelmän laitteita saadaan vähennettyä, jolloin mahdolliset vikapaikat harvenevat. Myös vian selvittämisaika on lyhyempi ja huoltohenkilökunnan koulutus järjestelmän huoltoon helpottuu laitteistoiden vähyden vuoksi.

Vaihtovirta on tasavirtaan verrattuna katkaisijoille helpompi johtuen virran luonnollisesta nollakohdasta. Tasajännitteeltä nollakohta puuttuu, joten katkaisutilanteessa syntyvä valokaari on vaikeampi sammuttaa. Tämä on otettava huomioon katkaisijoita mitoittaessa kun tasajännitejärjestelmän katkaisijat mitoitetaan tasasähkölle, katkaisijan tulee olla järeämpi verrattaessa saman tehoiseen vaihtojännitejärjestelmään /14/.

Lyhytikäisimmät komponentit tasajännitejärjestelmässä ovat suuntaajan suodattimen kondensaattorit sekä suuntaajan tarvitseman jäähdyttimen puhaltimet. Kondensaattorien käyttöikä suuntaajassa voi lyhimmillään olla 4-6 vuotta ja puhaltimilla 2-4 vuotta käytöstä ja käyttöympäristöstä riippuen. Tämä lisää järjestelmän



huoltotarvetta verrattuna AC-järjestelmään, sekä huolto-ohjelmaa laiminlyötyessä aiheuttaa käyttökatoja /19/.

## **5 DC-JAKELUA VARTEN MCS-RUNKOON VALMISTETTU PDU**

Tasajännitteinen sähkönjakelujärjestelmä tarvitsee osakseen sähkönjakeluyksikön eli PDU:n. PDU:lla virta jaetaan sitä tarvitseville laitteille, PDU:n sisältämien komponenttien valvoessa virran kulutusta sekä hoitaen oikosulku- ja ylivirtasuojauksen.

### **5.1 PDU:n kalustus**

PDU:n tärkeimmät komponentit ovat etukoje, johdonsuojakatkaisijat sekä mittausjärjestelmä. Lisäksi PDU sisältää jakelukiskot, joilla virta johdetaan etukojeelta johdonsuojakatkaisijoille sekä mahdolliset riviliittimet, joilta viedään johdotus kulutuspisteille sekä itse runko, johon komponentit asennetaan. Tärkeä tekijä suunniteltaessa PDU-yksikköä on sen muunneltavuus. Tällöin ei tarvita useaa erilaista laitetta eri käyttötarkoituksiin, vaan yksi runko voidaan räätälöidä useiden asiakkaiden tarpeita varten.

#### **5.1.1 Runko**

Koska suunniteltavan PDU:n prototyypin pääasiallinen käyttökohde tulee olemaan esittelykäyttö, haluttiin siitä tehdä kompaktin kokoinen, jolloin kuljettaminen on helppoa, mutta myös riittävän suuri, että laite voidaan ottaa myös myyntiin. Tämän vuoksi rungoksi valittiin MCS-tyypin 600 mm \* 600 mm runko.

MCS-pienjännitekeskukset ovat sähkön jakeluun, ohjaukseen sekä automaatiokäyttöön tarkoitettuja keskuksia. Rungot on hyväksytty korkeintaan 800 A nimellisvirralle sekä korkeintaan 690 V nimellisjännitteelle. Koska suunniteltavan PDU-yksikön käyttöjännite tulee olemaan 380 VDC, toimii rajoittavana tekijänä nimellisvirta. /7/

### 5.1.2 Etukoje

Etukoje kytkee PDU:n irti muusta sähköverkosta tarpeen niin vaatiessa. Etukojeeksi voidaan valita joko manuaalinen kytkin, jolloin laite tarvitsee erillisen suo-jareleen tai sulakkeet vastaamaan vikasuojauksesta, tai voidaan valita kompakti-katkaisija, joka sisältää ylivirtasuojan. Oikosulkusuojaus sekä virran rajoituskyky on sulakkeilla tehokkaampaa kompaktikatkaisijoihin verrattuna, mutta tapauksis-sa, kuten tässä työssä, joissa oikosulkuvirrat eivät muista laitteista johtuen pääse nousemaan liian suuriksi ei tätä tarvitse ottaa huomioon.

Kompaktikatkaisija vie huomattavasti pienemmän tilan kuin erillinen kytkin sekä sulakkeet. Myös käyttökatkosten pituus lyhenee huomattavasti, koska sulakkeita ei tarvitse erikseen vaihtaa, vaan vian korjauksen jälkeen katkaisija käännetään kiinni asentoon. Kompaktikatkaisijan käyttö on siten hyvin suositeltavaa, varsin-kin tässä työssä, jossa tilan käyttö nousee tärkeään osaan.

Katkaisijaa mitoitettaessa on syytä ottaa huomioon:

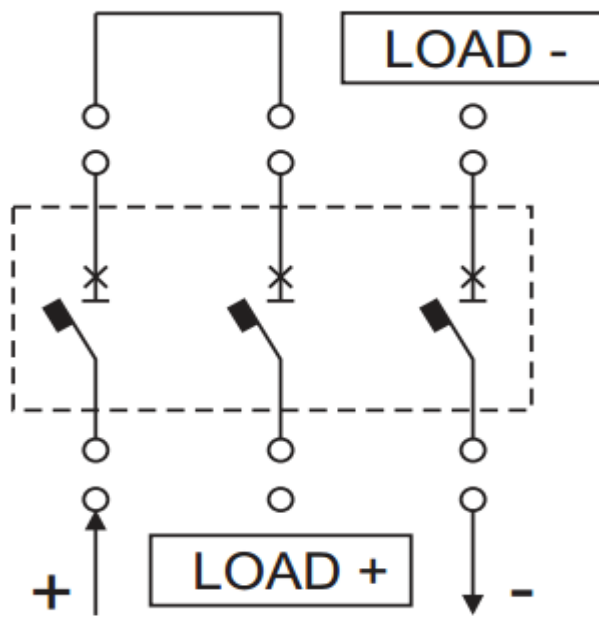
- laitteen fyysinen koko
- riittävä oikosulkuvirran  $I_k$  katkaisukyky
- riittävä jännitekestoisuus
- jatkuvan kuormitusvirran eli nimellisvirran  $I_n$  kesto ja
- oikosulkuvirran rajoituskyky.

Vaikeuttavana tekijänä DC-järjestelmässä on vähäinen käytettävissä olevien kom-ponenttien määrä, koska läheskään kaikkia katkaisijoita ei ole hyväksytty käytet-täväksi DC-järjestelmässä. Syynä on tasavirralla puuttuva luonnollinen nollakoh-ta, joka saattaa oikosulkua vastaan katkaistaessa aiheuttaa katkaisijan koskettimi-en välille valokaaren, jota ei saada sammutettua riittävän nopeasti. Yleistyneistä tasajännitejärjestelmistä johtuen valmistajat ovat enenevissä määrin luokitelleet katkaisijoita myös tasajännitteelle. Yleinen muutos katkaisijalle on joko kosketti-

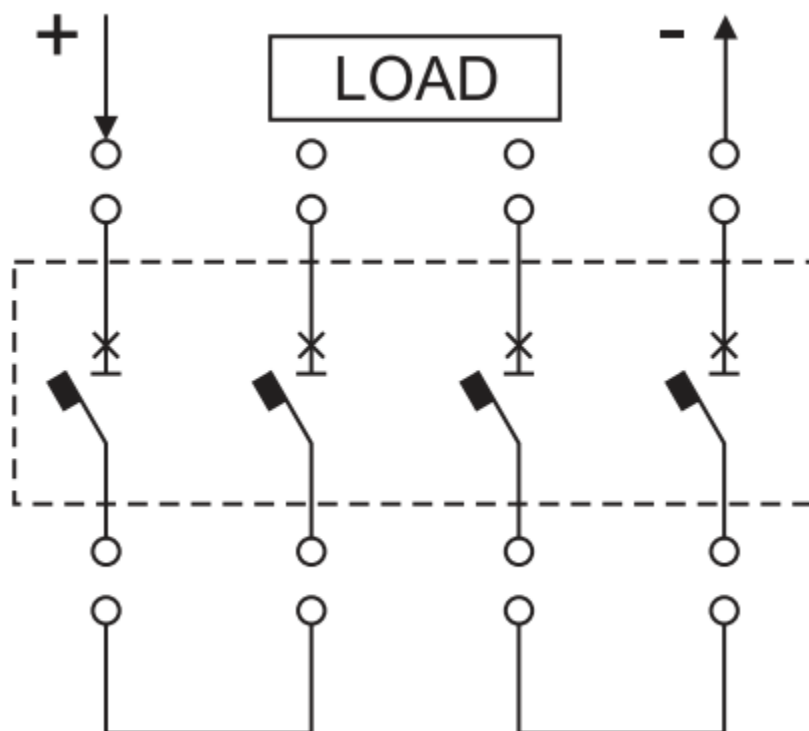
mien ilmavälin kasvattaminen, katkaisunapojen lisääminen tai DC-järjestelmällä sallitaan pienempi nimellisjännite kuin AC-järjestelmälle /9/.

Katkaisinvalmistajat ovat hoitaneet vaihtojännitettä vaikeammin katkaistavan tasajännitteen ohjauksen kytkemällä katkaisijan koskettimia sarjaan. Kuvassa 7 esitetään katkaisijan kolminapainen kytkentä, jolloin positiivisella puolella on kaksi kosketinta ja negatiivisella yksi. Käyttövarmuutta ja oikosulkuvirran katkaisukykyä saadaan kasvatettua entisestään kuvan 8 nelinapaisella kytkennällä, jolloin sekä positiivisella että negatiivisella puolella käytetään sarjaan kytkettynä kahta kosketinta. Tällöin saadaan kaksinkertaistettua katkaisijan ilmaväli ja näin ollen katkaisussa syntyvä valokaari saadaan katkaistua helpommin.

Katkaisijoissa kuitenkin syntyy aina tehohäviöitä koskettimien liitospinnoista johtuen, joten useamman koskettimen käyttö johdinta kohden lisää kojeen lämpöhäviöitä sekä kasvattaa fyysistä kokoa. Jo siirryttäessä kolminapaisesta kytkennästä nelinapaiseen, saattavat katkaisijan häviöt nousta jopa 28 %. Tämä on otettava huomioon suunniteltaessa PDU IP-luokituksestaan tiiviiseen koteloon, jolloin lämpenemisestä on erityistä haittaa laitteistolle /9/.



**Kuva 7.** Katkaisijan 3-napainen kytkentä /9/.



**Kuva 8.** Katkaisijan 4-napainen kytkentä /9/.

Etukojeeaksi valittiin ABB:n Tmax XT -sarjan katkaisija. XT-sarjan katkaisijat ovat olleet markkinoilla vasta vuodesta 2011 lähtien ja ne on luokiteltu sekä vaihto- että tasavirralla. XT-sarja on pienikokoinen ja sen katkaisukyky riittää oikosulkutilanteessa tasavirralla jopa 100 kA:iin saakka, laukaisukäyrästä riippuen. XT-sarjan katkaisijoiden teknisiä arvoja on esitetty taulukossa 2, joista käyttöön valittiin XT2 malli.

**Taulukko 2.** XT-sarjan katkaisijoiden teknisiä arvoja /9/.

	XT1	XT2	XT3	XT4
Nimellisvirta $I_n$	160	160	250	160/250
Napojat	3/4	3/4	3/4	3/4
Nimellisjännite DC $U_e$	500	500	500	500
Oikosulkuvirran $I_{cu}$ katkaisukyky kA	B, C, N, S, H	N, S, H, L, V	N, S	N, S, H, L, V
250 VDC 2 napaa sarjaan kytkettynä	18,25,36,50,70	36, 50, 70, 85, 100	36, 50	36, 50, 70, 85, 100
500 VDC 2 napaa sarjaan kytkettynä	-	-	-	36, 50, 70, 85, 100
500 VDC 3 napaa sarjaan kytkettynä	18,25,36,50,70	36, 50, 70, 85, 100	36, 50	36, 50, 70, 85, 100

### 5.1.3 Johdonsuojakatkaisijat

Kompaktikatkaisijalta virta johdetaan joko kiskostolla tai johtimilla johdonsuojakatkaisijoille, joilta johdotus viedään virtaa kuluttavalle laitteelle. Johdonsuojakatkaisijat toimivat kompaktikatkaisijan tapaan oikosulkusuojina erottaen vikaantuneen lähdön muusta järjestelmästä. Kun jokainen lähtö on oman johdonsuojakatkaisijan takana, vikasuojaus toimii selektiivisesti ja muut lähdöt pysyvät toiminnassa vian sattuessa, kun vain viallinen lähtö kytketään irti.

Johdonsuojakatkaisijaa mitoitettaessa on syytä ottaa huomioon:

- laitteen fyysinen koko
- riittävä oikosulkuvirran  $I_k$  katkaisukyky
- riittävä jännitekestoisuus ja
- suojattava kohde.

Myös johdonsuojakatkaisijoilla on sama ongelma kuin kompaktikatkaisijoilla, eli tasavirralla hyväksytyjä komponentteja on vähän. Pienten markkinoiden vuoksi ei pelkästään tasavirralla suunniteltuja komponentteja juurikaan ole, joten yleisin tapa on käyttää yhtä johtolähtöä kohden useampaa johdonsuojakatkaisijaa, jolloin

ne sarjaan kytkemällä saadaan kasvatettua ilmaväliä. Johdonsuojakatkaisijat toimivat 1-napaisinakin tasajännitekäytössä, mutta rajat oikosulkuvirran katkaisukyvyssä tulevat nopeasti vastaan, joten sarjaan kytkentä jää ainoaksi vaihtoehdoksi. Esimerkiksi ABB:n Smissline S200 -johdonsuojakatkaisijoilla maksimi jännite tasavirralla on 1-napaisena 125 VDC ja 2-napaisena 250 VDC /2/.

**Taulukko 3.** Johdonsuojakatkaisijoiden teknisiä arvoja /2/.

Napaluku	Nimellis- virta In A	Tyyppi	Oikosulku- virran lk kat- kaisukyky
2	0,2	S 282 UC-K 0.2	Rajoittamaton
	0,3	S 282 UC-K 0.3	Rajoittamaton
	0,5	S 282 UC-K 0.5	Rajoittamaton
	0,75	S 282 UC-K 0.75	Rajoittamaton
	1	S 282 UC-K 1	Rajoittamaton
	1,6	S 282 UC-K 1.6	Rajoittamaton
	2	S 282 UC-K 2	Rajoittamaton
	3	S 282 UC-K 3	6 kA
	4	S 282 UC-K 4	6 kA
	6	S 282 UC-K 6	6 kA
	8	S 282 UC-K 8	6 kA
	10	S 282 UC-K 10	6 kA
	16	S 282 UC-K 16	6 kA
	20	S 282 UC-K 20	6 kA
	25	S 282 UC-K 18	6 kA
	32	S 282 UC-K 25	6 kA
	40	S 282 UC-K 40	6 kA
	50	S 282 UC-K 50	4,5 kA
	63	S 282 UC-K 63	4,5 kA

Koska johtimien välinen jännite-ero on järjestelmässä 380 VDC (+190 VDC / -190VDC), karsiutui käytettäväksi johdonsuojakatkaisijaksi ABB:n Smissline S282 UC K –sarjan katkaisijat. 2-napaisella kytkennällä katkaisijat on hyväksytty käytettäväksi, kun suojattavien johtimien välinen jännite-ero on korkeintaan 440 VDC ja johtimen ja maan välinen jännite-ero korkeintaan 220 VDC, joten työssä

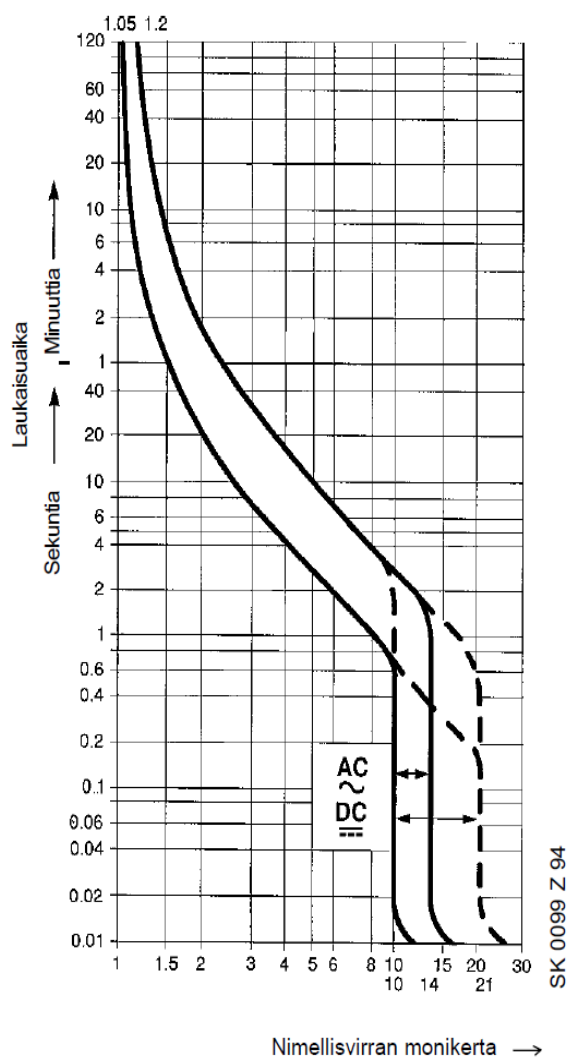


tarvittavat rajat täyttyvät. S280 UC K -sarjan johdonsuojakatkaisijat kattavat tau-lukon 3 mukaisen virta-alueen 0,2 A – 63 A, katkaisijan fyysisen koon pysyen samana, joten laitteisto on helppo räätälöidä asiakkaan toiveiden mukaan eri te-hoisille lähdöille rungon koon ja etukojeen muodostamissa rajoissa. Oikosulkuvir-ran katkaisukyky tasajännitteellä on kokoon 25 A asti 6 kA ja sitä suuremmilla nimellisvirroilla 4,5 kA /2/.

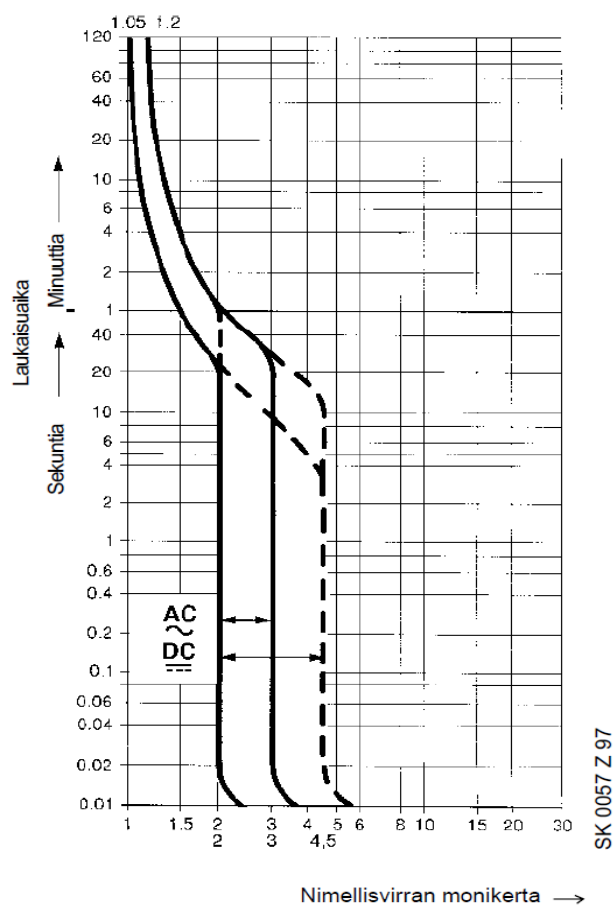
Johdonsuojakatkaisijan valintaan vaikuttaa myös suojattava kohde. Johdonsuoja-katkaisijoita on saatavilla eri laukaisukäyrillä, joista jotkin soveltuvat esimerkiksi moottoreiden ja johtimien suojaukseen sallien lyhytaikaisen ylikuormituksen ja jotkin toimivat nopeammin soveltuen esimerkiksi puolijohteiden suojaukseen /2/.

Kuvissa 9 ja 1 on esitetty laukaisukäyrien Z ja K kuvaajat. Laukaisukäyrällä K varustettuja johdonsuojakatkaisijoita suositellaan käytettäväksi laitteiden, kuten moottoreiden, valaisimien ja kaapeleiden ylikuormitus suojaamiseen ja lau-kaisukäyrällä Z varustettuja johdonsuojakatkaisijoita puolijohteiden suojaamiseen.

Kuvissa 9 ja 1 on esitetty laukaisukäyrien Z ja K kuvaajat. Laukaisukäyrällä K varustettuja johdonsuojakatkaisijoita suositellaan käytettäväksi laitteiden, kuten moottoreiden, valaisimien ja kaapeleiden ylikuormitus suojaamiseen ja laukaisukäyrällä Z varustettuja johdonsuojakatkaisijoita puolijohteiden suojaamiseen.



**Kuva 9.** Laukaisukäyrä K /2/.



**Kuva 10.** Laukaisukäyrä Z /2/

#### 5.1.4 Mittauslaitteisto

PDU-yksikkö sisältää myös sähköenergian mittauslaitteiston, jolla voidaan valvoa eri kulutuspuisteiden tehonkäyttöä. ABB:n tuotevalikoimassa on sekä AC- ja DC-käyttöön tarkoitettu virranmittauslaitteisto CMS 600. CMS 600 on logiikkaväylään kytkettävä mittausjärjestelmä, joten se on helppo kytkeä kiinteistön muuhun valvontajärjestelmään ja tieto virranmittauksista saadaan helposti vietyä haluttuun tilaan väyläkaapeloinnilla. CMS laitteistoon perehdytään tarkemmin työn tulevilla kappaleilla.

## 5.2 Edut verrattuna MNS runkoon

ABB:n tuotevalikoiman PDU<sub>Pro</sub>, vaihtojännitekäyttöön tarkoitettu PDU, on rakennettu MNS runkoon, joten olisi luonnollista tehdä myös DC-jakelua varten kalustettu PDU samaan runkoon. Kyseessä on kuitenkin vasta prototyypin valmistus esittelykäyttöön ja tutkimus mahdollisesta laajemmasta DC-jakelun käytöstä, joten jakelusta vastaavan laitteen on oltava helposti siirrettävissä ja edullinen, kuitenkin tarjoten mahdollisuuden myös myydä laitetta asiakkaille.

MNS ja MCS ovat molemmat pienjännitekojeistojärjestelmiä, jotka on suunniteltu sähkön ohjaus, -jakelu ja automaatiokäyttöön, joten valinta rungosta tapahtui näiden kahden järjestelmän välillä. Runkojen teknisiä arvoja on esitetty taulukoissa 4 ja 5.

**Taulukko 4.** MNS-runkojen mitat /8/.

Mitat	
Korkeus	2200 mm
Kenttäleveys	400, 600, 800, 1000, 1400 mm
Syvyys	400, 600, 800, 1000, 1200 mm

**Taulukko 5.** MCS-runkojen mitat /7/.

Mitat	
Korkeus	425, 525, 625, 825, 925, 1025, 1225, 1525, 1825, 2025 mm
Kenttäleveys	150, 300, 450, 600 mm
Syvyys	180, 260, 400 mm

Kuten taulukoista 4 ja 5 nähdään, on MCS-runkoja saatavissa huomattavasti useampina eri kokoina. MNS-rungot sen sijaan ovat syvyydeltään ja leveydeltään huomattavan paljon suurempia, jolloin niihin voidaan sijoittaa suurempi määrä sekä tehokkaampia komponentteja, kuten taajuusmuuttajia. Syvyydeltään suurin MCS- ja pienin MNS-runko ovatkin samoja ja MCS-rungon suurin korkeus on 2000 mm MNS-rungolla vastaavasti 2200 mm, joten ne eivät juuri syö toistensa markkinoita.

MNS-rungot ovat saatavilla vain kiinteällä 2200 mm korkeudella, joten muunneltavuus ja käyttö hyvin pienissä kohteissa ja laitteissa on hankalaa.

**Taulukko 6.** Kojelaitteiden virtarajat /8/, /9/.

	MCS	MNS
Nimellisvirta $I_n$	800 A	6300 A
Terminen nimelliskestovirta 1s $I_{cw}$	35 kA	100 kA
Dynaaminen nimelliskestovirta $I_{pk}$	73,5 kA	250 kA

Taulukon 5 mukaan, MNS-rungot kestävät yli 7 kertaisen nimellisvirran MCS-kojelaitteisiin verrattuna. MCS-runkoon ei voida tehdä kovin suuritehoisia PDU-yksiköitä, tai muitakaan jakelujärjestelmiä, alhaisesta nimellisvirrasta johtuen.

## 6 MITTAUKSET

Koska valmistetun PDU:n tärkeimpiä käyttökohteita ovat datakeskukset, on laitteen vastattava niiden vaatimin erikoistarpeisiin. Yhä useammin yritykset mieluummin vuokraavat itselleen palvelintilaa, kuin perustavat oman datakeskuksen. Tällöin yrityksen ei tarvitse erikseen varata tilaa servereitä varten ja palkata henkilökuntaa vastaamaan palvelimista.

Palvelimien tarjoajan on loogista laskuttaa asiakkaitaan käytön mukaan. Tämä voidaan suorittaa sekä verkkoliikenteen että käytetyn sähköenergian mukaan. Valmistettuun PDU-yksikköön tulee logiikkaväylään liitettävä virranmittausyksikkö, joka tallentaa erikseen jokaisen asiakkaan kuluttaman virran, jota käytetään energiankulutuksen laskentaan, jonka mukaan laskutus voidaan suorittaa.

Mittauksilla voidaan suorittaa myös tiedonkeruuta huippukulutuksesta, keskimääräisestä kulutuksesta sekä mahdollisesti päivän kulutushuipun ajankohta. Mittausten ei tarvitse olla erityisen tarkkoja, vaan ne antavat suurpiirteisen tiedon laskutusta varten. Jos laskutus perustuisi pelkkään energiankulutukseen, olisi mittaus-tarkkuuteen kiinnitettävä erityistä huomiota taloudellisten tekijöiden vuoksi.

### 6.1 Tarvittavat mittaukset

Mittauksista on saatava tarvittavat suureet sähkötehoa varten. Tällä tiedolla järjestelmää voidaan valvoa ja datakeskusten asiakkaita voidaan laskuttaa käytetyn sähköenergian mukaan.

Koska jakelujärjestelmä toimii tasajännitteellä, ei järjestelmään tarvita mittausta vaihtojännitteellä tapahtuvan vaihesiirron mittaukseen. Tämä helpottaa myös senkin puolesta, ettei jokainen johtolähtö tarvitse erillistä jännitteen mittausta, koska jokaisessa lähdössä on tiedettävä jännitteen ja virran vaihesiirto.

Koska sähköteho  $P_{DC}$  on kaavan 9 mukaisesti virran  $I_{DC}$  ja jännitteen  $U_{DC}$  tulo, on nämä mittaukset saatava logiikalle. Virta mitataan PDU-yksikön jokaiselta johto-

lähdöltä. Tällöin saadaan tarkasti tietoon jokaisen asiakkaan ja lähdön tehonkulutus.

$$P_{DC} = U_{DC} * I_{DC} \quad (9)$$

## 6.2 Mittauslaitteisto

Virranmittauslaitteistoksi valittiin jo kohdan 5.1.4 mukaisesti CMS 600 -laitteisto. CMS 600 on virran mittaukseen tarkoitettu mittauslaitteisto, jolla voidaan valvoa esimerkiksi tehon kulutusta. Laitteessa on väyläliitäntä RS-485, joka tukee Modbus RTU – protokollaa, jolloin mittaustiedot saadaan helposti valvontalaitteistolle tai liitettyä rakennuksen muuhun automatiikkaan. Laitteeseen voidaan liittää korkeintaan 64 mitta-anturia, joten mikäli mitattavia johtolähtöjä on useampia, on myös mittausyksiköitä oltava useampia.

CMS-antureita on 3 eri tehoalueille ja tarkkuuksille tarkoitettua mallia, joiden teknisiä arvoja on esitetty taulukossa 7. Anturit kattavat virta-alueet 0-20 A, 0-40 A ja 0-80 A, jolloin anturi voidaan valita käytettyjen johdonsuojakatkaisijoiden nimellisvirtojen mukaan.

**Taulukko 7.** CMS-anturien tarkkuuksia /1/.

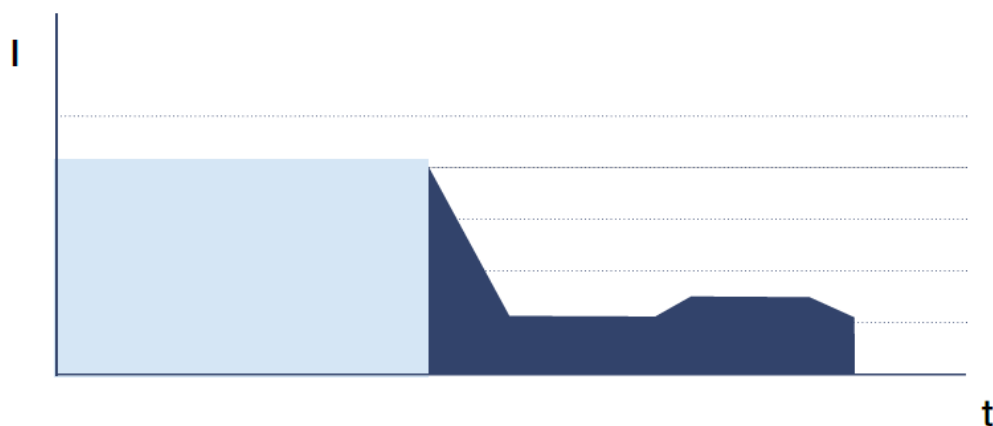
Sensori	CMS-100PS	CMS-101PS	CMS-102PS
Mittausalue	0..80 A	0..40 A	0..20 A
DC tarkkuus (+25°C)	0,70 %	1,00 %	1,70 %
AC tarkkuus (+25°C)	0,50 %	0,50 %	0,50 %

Sähkötehoa P varten tarvitaan virran lisäksi myös jännitetieto. Jännitemittauspiste sijaitsee jo pääjakeluyksiköllä, koska tasajännitteellä ei ole tarvetta mitata jokaisen johtolähdön jännitettä erikseen. Jännitteen mittauksen suorittava mittari riippuu käytettävästä automaatiojärjestelmästä.

### 6.3 Toimintakuvaus ohjelmoitavalle logiikalle

Koska tasajännitejärjestelmän teho on huomattavasti helpompi laskea kuin vaihtojännitteellä, riittää laskentaan kaavan 5 käyttäminen. Järjestelmästä otetaan tasaisin väliajoin, esimerkiksi 20 ms välein sekä jännitetieto että mitattavan johtolähdön virta-arvo ja nämä keskenään kertomalla saadaan kyseisen johtolähdön sen hetkinen teho. Tiedot tallennetaan valvontatietokoneen muistiin, jolloin saadaan trendikäyrä tehonkulutuksesta sekä saadaan laskettua käytetty sähköenergia.

Kuvassa 11 esitetystä virranmittauskuvaajasta voidaan helposti tarkkailla muutoksia tehon kulutuksessa. Tehtäessä samanlainen kuvaaja, johon mitattu virta kerrotaan mitatulla jännitteellä ja laskemalla käyrän alapuolella olevan alueen pinta-ala saadaan laskettua myös käytetty sähköenergia Wh.



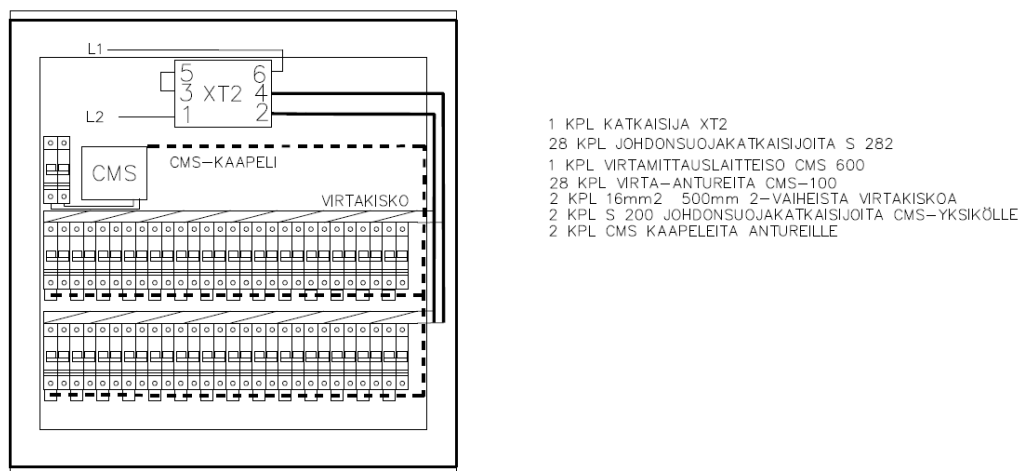
**Kuva 11.** Virran mittaus ajan funktiona  $I/t$ .



## 7 PROTOTYYPIN VALMISTUS

Tärkeä osa työtä on myös prototyypin suunnittelu. Uusiutuvien energialähteiden käyttö yleistyy ja DC-käyttöön tarkoitettuja komponentteja tulee markkinoille nopealla tahdilla, joten teoreettisten soveltuvuuksien lisäksi komponentteja on hyvä testata myös käytännön sovelluksessa. Lisäksi ABB pystyy vastaamaan mahdolliseen kysyntään DC-jakelun osalta, mikäli asiakas haluaa panostaa moderniin pienjännitejakeluun. Prototyyppi valmistetaan ABB Low Voltage Systemsin tiloissa tämän työn valmistumisen jälkeen.

Prototyypistä piirrettiin kuvassa 12 esitetty layout-kuva, josta ilmenevät komponenttien sijoituspaikat sekä komponenttien johdotukset. Lisäksi prototyypistä piirrettiin piirikaavio, jolloin komponenttien johdotus on helppo suorittaa. Kuvat piirrettiin CADS-ohjelmalla.



**Kuva 12.** PDU:n layout-kuva.

Komponentit asetellaan runkoon kuvan 12 mukaisesti. Etukoje XT2 asennetaan poikittain rungon yläosaan ja sitä syöttävä kaapeli voidaan tuoda joko ylä- tai alakautta. Alakautta tuotaessa johdin asennetaan pohjalevyn alle, josta se viedään

katkaisijalle. Etukojeen positiivisen syötön kaksi napaa, 3 ja 6, kytketään sarjaan ja negatiiviselle puolelle riittää 1-napainen kytkentä. Näin ollen johdinten välisessä oikosulussa avataan kolme kosketinta ja vaiheen ja maan välisessä oikosulussa 1 tai 2 riippuen vikapaikasta. Etukojeelta viedään johdotus kaksivaiheisille virtakiskoilta, joilla syötetään johdonsuojakatkaisijoille.

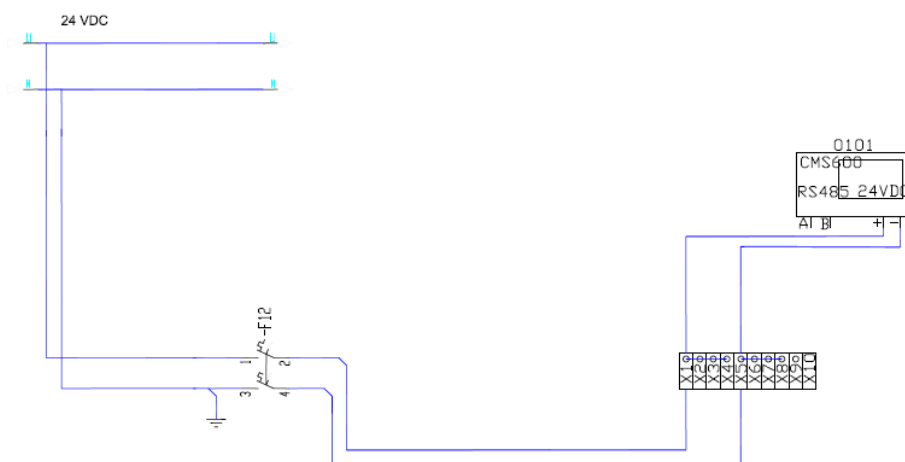
Johdonsuojakatkaisijat asennetaan kahteen riviin porrastaen. Porrastus helpottaa johdotustöitä, kun toinen rivi on hieman irti pohjalevystä. Pohjalevyn leveys on 520 mm ja kaksiosaisen johdonsuojakatkaisijan leveys on 35 mm.

$$520 \text{ mm} : 35 \text{ mm} = 14,857.. \quad (10)$$

Johdonsuojakatkaisijoita tulee korkeintaan 14 kappaletta yhtä asennuskiskoa kohden, joten lähtöjen yhteismäärä on korkeintaan 28 etukojeen virtaraja huomioon ottaen. Jos halutaan asentaa myös apukoskettimet tai hälytyskoskettimet vikatietoja varten, vähenee myös lähtöjen määrä. Johdonsuojakatkaisijoiden, S 282, on oltava kaksiosaisia, jolloin toisella koskettimella katkotaan positiivista ja toisella negatiivista johdinta. Näin ollen saadaan johdinten välisten oikosulkujen varalta 2 ilmaväliä ja maata vasten tapahtuvien oikosulkujen varalta 1 ilmaväli.

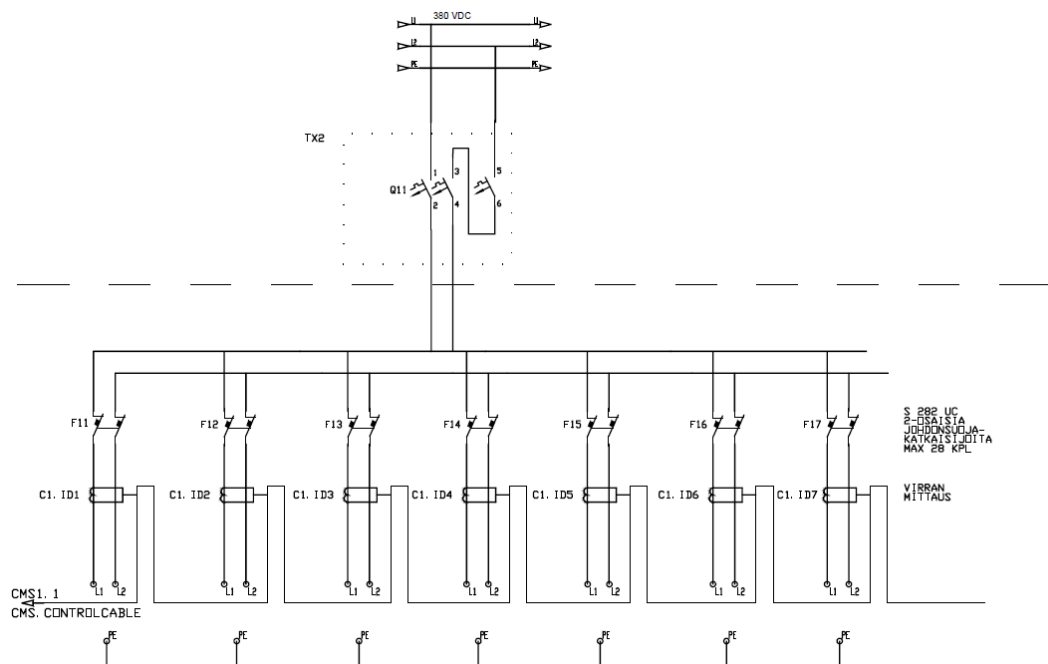
Johdonsuojakatkaisijoiden lähtöihin asennetaan CMS-anturi. Anturin tyyppi valitaan johdonsuojakatkaisijan koon ja halutun mittaustarkkuuden mukaan. Johdonsuojakatkaisijalta hoidetaan johdotus kulutuspiisteelle, jolloin erillistä riviliitintä ei tarvita.

Kuvissa 13 ja 14 on esitetty laitteen piirikaaviot, joiden mukaan johdotus laitteen sisällä tapahtuu.



**Kuva 13.** 24 VDC syötön piirikaavio.

CMS-yksikkö asennetaan sivuseinämään näyttölaite oveen päin, jolloin asennettaessa ikkunallinen ovi voidaan yksiköstä tarkkailla arvoja ovea avaamatta. Syöttö CMS-yksikölle tuodaan 24 VDC jännitteellä ulkopuolelta virtalähteeltä, joka syöttää mahdollisia muiden kojeistojen 24 VDC kuormia. Tällä tavoin jokaiseen kojeeseen ei tarvitse asentaa omaa tilaa vievää virtalähdettä. CMS-yksikön syöttöä varten tarvitaan lisäksi kaksi johdonsuojakatkaisijaa S200, joilla hoidetaan 24 VDC syötön suojaus.



**Kuva 14.** PDU:n piirikaavio.

## 8 MARKKINOINTIMATERIAALI

Laite suunniteltiin käyttäen ABB:n valikoimasta löytyviä komponentteja, joten laitteen toteuttaminen ja siten myös asiakkaille toimittaminen on mahdollista. Tämän vuoksi laitteelle haluttiin markkinointimateriaali, jossa kerrotaan laitteen tärkeimmät tekniset tiedot sekä käyttökohteet. Myyntiä helpottamaan haluttiin myös laskentaohjelma, jolla saadaan nopeasti laskettua suuntaa-antava kustannus-arvio laitteesta kiinnostuneelle.

### 8.1 Esitteen suunnittelu

Esitteessä halutaan tuoda ilmi laitteen käyttökohteet sekä tärkeimmät tekniset ominaisuudet. Esite tehtiin valmiiksi pohjaksi, jossa on laitteen tekniset tiedot sekä mahdolliset käyttötarkoitukset valmiina. Lopulliset kuvat lisätään esitteeseen, kunhan prototyyppi on saatu valmistettua.

### 8.2 Kustannuslaskenta Excel/ohjelma

Suunniteltavan laitteen tärkeimpiä ominaisuuksia on helppo muunneltavuus käyttökohteiden mukaan. Muunneltavuus vaikuttaa siten myös laitteen hintaan, koska komponentit esimerkiksi 5:lle lähdölle on edullisempi hankkia ja asentaa kuin täyteen mitoitettun 28 tai AC-järjestelmän 56 lähdön komponentit. Tämän vuoksi haluttiin tehdä Excel-ohjelmalla laskentataulukko, joka laskee laitteiston hinnan lähtöjen määrän, lähtöjen yhteisen nimellisvirran sekä järjestelmän tyyppin, AC tai DC, mukaan.

Koska etukojeen nimellisvirta on 160 A ja lähtöjen määräksi DC-järjestelmässä saatiin korkeintaan 28 kpl, toisen näistä suureista ylittyessä taulukko laskee kustannukset tarvittavien kojeistojen määrän mukaan. Taulukko ottaa huomioon myös erot DC ja AC – järjestelmien välillä, jolloin valittaessa vaihtovirtajärjestelmä kustannuslaskenta vaihtaa etukojeen 3-napaisesta 4-napaiseksi, sekä lisää käytettävissä olevien johtolähtöjen määrää koska tasavirralla tarvittiin 2-napainen

johdonsuojakatkaisija lähtöä kohti ja vaihtovirralla riittää 1-napainen, koska nollajohdin ei tarvitse oikosulkusuojausta.

Taulukossa käytettävät kaavat olivat pääosin yhteen - ja kertolaskuja, mutta tarvittiin myös OR- ja IF-lausekkeita, joilla saatiin yksi taulukko toimimaan sekä AC-että DC-järjestelmien kustannuksia laskettaessa, sekä ottamaan huomioon mitoituksen asettamat virtarajat sekä johtolähtöjen maksimi määrän. Taulukon hintatiedot on nopeasti päivitettävissä tuoreimpien hinnastojen mukaisiksi, jolloin saatava tarjouslaskelma on aina mahdollisimman ajantasainen. Kuva laskentataulukosta on liitteessä 1.

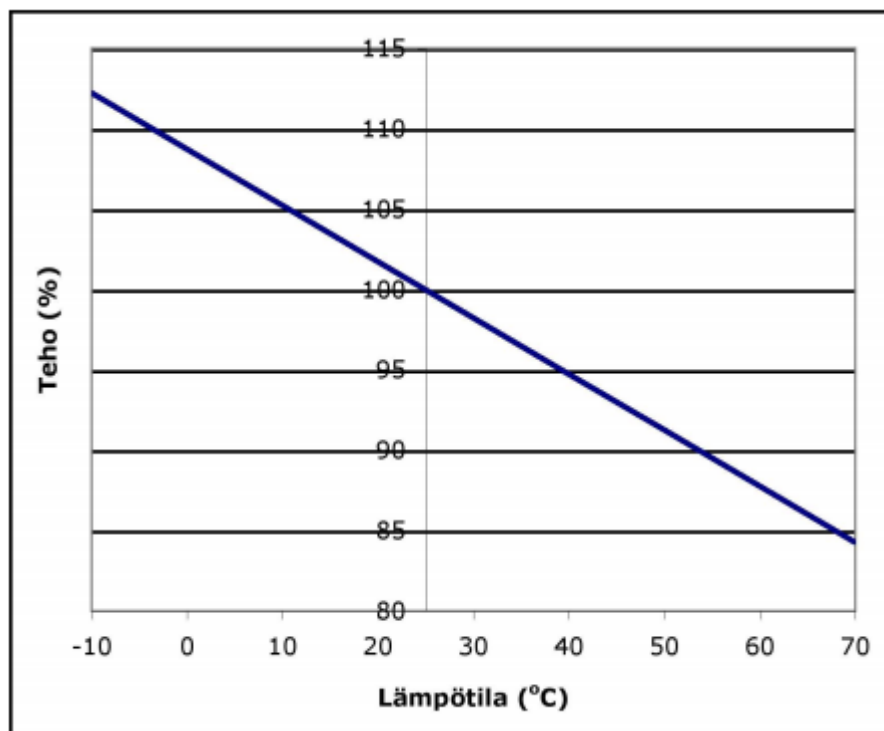
## 9 UUSIUTUVIEN ENERGIALÄHTEIDEN KÄYTTÖ KONESALEISSA

Työhön haluttiin sekä ABB:n että opinnäytetyön tekijän puolesta lyhyt katsaus uusiutuvien energianlähteiden liitettävyydestä datakeskuksiin. Koska aurinkopaneeleista ja polttokennoista saatava sähkö on tasavirtaa, on loogista tutkia, kuinka helposti tasavirralla suoritettuun jakeluun saadaan liitettyä tasavirtaa tuotava sähköenergianlähde.

Konesalien kuluttama energia on lähes täysin sähköenergiaa, joka muuttuu palvelimissa lämmöksi, joten paikallisen energiantuotannon käyttäminen olisi mielekäs vaihtoehto. Energian kulutus konesaleissa on suhteellisen tasaista, vaikkakin kesällä energiaa kuluu enemmän laitteiden jäähdytyksen vuoksi, koska talvella jäähdytys on helppoa ja halpaa järjestää. Tällöin aurinkoenergiaa voidaan käyttää taasaamaan kulutusta, eli pienentämään kulutushuippua, koska lämpimimmät ajat vuodesta ovat myös auringosta saatavan energian puolesta tuottavimmat.

Suomi on maantieteelliseltä sijainniltaan otollinen datakeskusten rakentamista varten. Vuoden keskilämpötila on lähellä nollaa, joten palvelimien jäähdytys on helppoa hoitaa. Jäähdyttämiseen käytettävää kylmää vettä on Suomessa helposti saatavilla rannikoilla sekä järvien läheisyydessä, joten esimerkiksi jäähdytyskulut verrattaessa Etelä-Eurooppaan ovat huomattavasti alhaisemmat. Myös korkea tekninen osaaminen auttaa yrityksiä valitsemaan Suomen datakeskusten rakennuspaikaksi, kuten jo esimerkiksi Google on tehnyt.

Vaikka auringosta saadaan enemmän energiaa kesäisin kun päivät ovat pidempiä, on tuotto korkeaa, varsinkin Suomessa, myös talvisin. Paneelista saatava sähköteho on, tiettyyn rajaan asti, sitä korkeampi mitä kylmemmät olosuhteet ovat, kuten kuvasta 15 nähdään. Lisäksi puhdas lumi heijastaa jopa 75 % auringon säteilystä, jolloin varsinkin alkukevällä saatava energian tuotto on yllättävän korkea /4/.



**Kuva 15.** Paneelin teho lämpötilan funktiona, kun nimellisteho saavutetaan lämpötilassa 25 °C /18/.

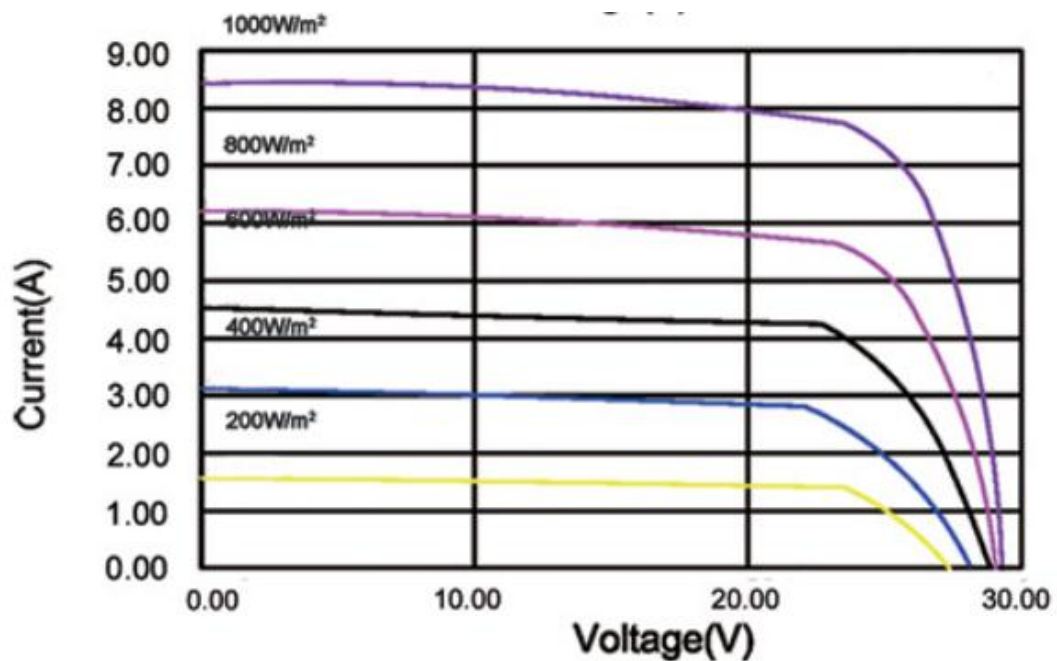
Koska datakeskusten pientasajännitejakelussa on yleistynyt jännitetaso 380 VDC, ei tasajännitteen suoma korkeampaa pienjänniterajaa 1500 V päästä hyödyntämään. Aurinkosähkön tuotannossa tästä voidaan hyötyä, jolloin siirtojännitteenä voidaan käyttää korkeita jännitteitä komponenttien niin salliessa, vaikkakin useimmat aurinkopaneelivalmistajat rajaavat sarjaan kytkettäessä sallituksi maksimijännitteeksi 1000 VDC.

Aurinkosähkön huonoja puolia on auringon tuottaman energian epätasaisuus ajallisesti. Ensinnäkään yöllä auringosta ei saada ollenkaan energiaa ja päivällä auringon säteilyenergia on epätasainen kellonajasta riippuen. Myös pilvisyys vähentää paneeleille asti pääsevää säteilyenergiaa. Aurinkopaneelin tuottama jännite muuttuu lämpötilan sekä auringon säteilyenergian mukaan, joten paneelia ei voi kytkeä



suoraan pienjännitejakeluun. Kuvassa 16 on esitetty 50 W aurinkopaneelin ominaiskäyrät eri säteilyvoimakkuuksilla.

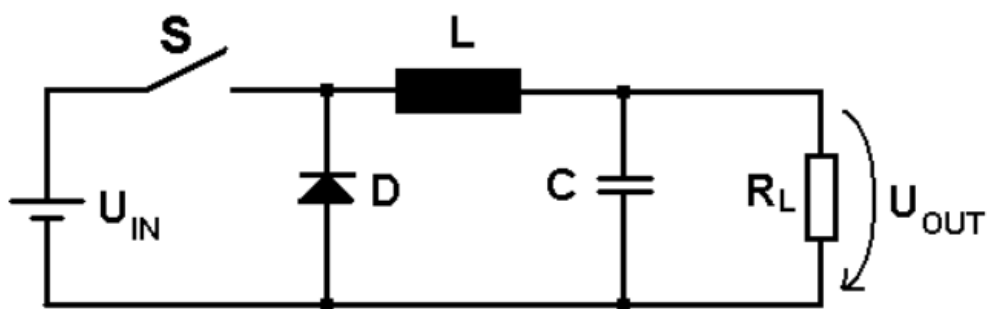
Paneelien jännitetason on oltava liitettävää järjestelmää huomattavasti korkeampi, jolloin vähäiselläkin auringon säteilyllä paneeleista saatava jännite olisi liitettävää järjestelmää korkeampi ja liitettävyys onnistuu jännitettä pudottavalla DC/DC muuntimella. Aurinkopaneelien liittäminen DC-jakeluun olisi suoritettava DC/DC muuntimella, jolla aurinkopaneelien tuottama korkeampi jännitetaso muunnetaan jakelua varten matalammaksi.



**Kuva 16.** Aurinkopaneelin antama virta ja jännitekäyrä eri säteilyvoimakkuuksilla /17/.

### 9.1 Liitettävyys DC/DC -muuntajalla

Yksinkertaisimmillaan DC/DC-muuntajan toiminta voidaan tehdä kuvan 17 kaltaisella hakkurimuuntimella. Aurinkopaneelien jännite on korkeampi kuin syötettävän verkon jännite ja katkojalla S katkotaan paneeleilta saatavaa jännitettä, jolloin jännite pienenee ja käämi L sekä kondensaattori C suodattavat ja tasaavat ulostulevan jännitteen.



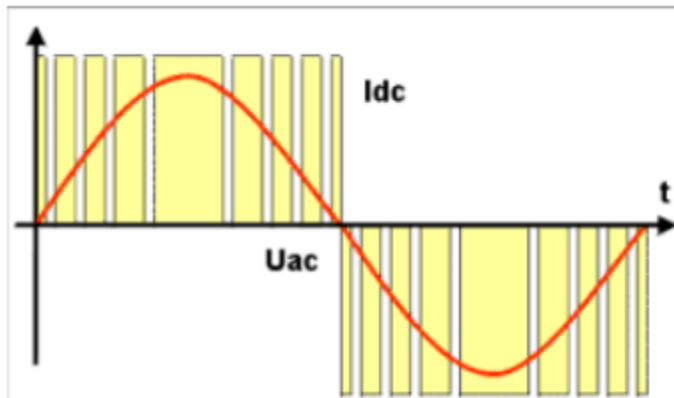
**Kuva 17.** Hakkurimuuntajan yksinkertaistettu kytkentä /16/.

Haasteita aiheuttavat erityisesti suuret tehot sekä jännitteet, jolloin soveliaiden puolijohdekomponenttien löytäminen on haasteellista. Koska DC-jakelussa on jo käytössä tasasuuntaajayksikkö, jolla verkosta tuleva jännite tasasuunnataan, voitaisiin tehonlähde yhdistää kyseiseen järjestelmään, jolloin aurinkosähkön DC/DC-muuntaja ei tarvitsisi erillistä suodatuslaitteistoa ja selvittäisiin pienemällä määrällä komponentteja.

Huonoja puoli hakkuriliitynnässä on valmiiden laitteiden puuttuminen markkinoilta, jolloin laite olisi erikseen suunniteltava. Lisäksi laite tarvitsee ohjausjärjestelmän ohjaaman katkaisijaa sekä vahtimaan syöttävää sekä aurinkopaneelien jännitettä etsien MPP, eli Maximum Power Point, pistettä jolla aurinkopaneelin tuotama teho on korkeimmillaan /13/.

## 9.2 Liitettävyyys DC/AC -suuntaajalla

DC/DC – muuntimen sijaan voitaisiin paneeleilta saatava tasavirta vaihtosuunnata ja uudelleen tasasuunnata tasasuuntaajayksiköllä.



**Kuva 18.** Vaihtosuuntaajan syöttämä virta sekä jännite /10/.

Vaihtosuuntaajan ei tarvitse olla siniaaltosuuntaaja, koska vaihtosuuntaajan tuottama sähkö tasasuunnataan joka tapauksessa. Tällöin selvittää pienemmällä määrällä komponentteja sekä saadaan laitteistolle parempi hyötysuhde. Maximum Power Point – ominaisuudella varustetun AC/DC - suuntaajan käyttöä puoltaa valmiiden vaihtosuuntaajien helppo saatavuus ja niitä on myös ABB:n valikoimassa. Huonona puolena on ylimääräinen suuntaus kun tasavirta ensin vaihtosuunnataan ja taas uudestaan tasasuunnataan, jolloin järjestelmän hyötysuhde laskee. Lisäksi vaihtosuuntaaja saattaa aiheuttaa yliaaltoja muuhun jakeluverkkoon /10/.

## 10 YHTEENVETO

Työn perimmäinen tarkoitus, eli jakeluyksikön kalustus ja tasavirralle suunniteltujen komponenttien etsiminen, osoittautui myös haastavimmaksi tehtäväksi. Lisäksi aiheen laajuus sekä markkinapotentiaali tulivat itselleni yllätyksenä samoin kuin aiheen aikaisempi tutkimus. Tasavirralla suoritettava pienjännitejakelu tulee yleistymään varsinkin teollisuudessa sekä tietokonesaleissa mutta sen mahdollisuuksia on tutkittu paljon myös yksittäisten kuluttajien kannalta ja aurinkovoiman lisääntyminen tulee lisäämään aiheen tutkimista.

Työssä oli kiireinen aikataulu, mutta tavoitteissa pysyttiin ja työ valmistui aikataulussaan. Alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen prototyyppiä ei kuitenkaan valmisteta kuin vasta työn jälkeen. Prototyypin valmistaminen ja valmistuksen dokumentointi olisi ollut mielenkiintoista seurata ja valvoa.

## LÄHTEET

/1/ ABB CMS – Current Measurement System User manual. Verkkojulkaisu.

Viitattu 1.4.2013

[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/85a1bbf0ade460a283257a8c003fcffb/\\$file/2CCC481001M0201\\_CMS\\_User-Manual\\_EN\\_DE\\_RU.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/85a1bbf0ade460a283257a8c003fcffb/$file/2CCC481001M0201_CMS_User-Manual_EN_DE_RU.pdf)

/2/ ABB Johdonsuojakatkaisijat S 200 P – sarja. Verkkojulkaisu. Viitattu 1.4.2013

<http://www.abb.com/product/seitp329/8c16451a2018a302c1256ffe004a1de3.aspx>

/3/ ABB Low Voltage Systems. (2013). *Direct current in data centers*.

/4/ ABB Low Voltage Systems. (2013). *Photovoltaic plants*

/5/ ABB lyhyesti. Suomessa. Viitattu 1.3.2013

<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/0b5e2755355c156dc12579bb003910a4.aspx>

/6/ ABB lyhyesti. Ydinliiketoiminnat. Viitattu 1.3.2013

<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/5b3b47abc1e9e75dc2256b20003f96db.aspx>

/7/ ABB. (2003) MCS-esite. Verkkojulkaisu. Viitattu 13.4.2013

[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/357333a15ac86009c2256cee003e399c/\\$file/MCS-esite-suomi.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/357333a15ac86009c2256cee003e399c/$file/MCS-esite-suomi.pdf)

/8/ ABB MNS – Modulaarinen pienjännitekojeistojärjestelmä. Esite. Verkkojulkaisu. Viitattu 29.3.2013

[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/04c0cc9633c5e151c1257aaa003a2d26/\\$file/MNS%20FI%201TFC902032N1801%20lowres\\_03102012.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/04c0cc9633c5e151c1257aaa003a2d26/$file/MNS%20FI%201TFC902032N1801%20lowres_03102012.pdf)

/9/ ABB. SACE Tmax XT. Technical catalogue. Verkkojulkaisu. Viitattu 29.3.2013.

[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/67da0bf8b1aa52fcc1257909004b2e42/\\$file/1SDC210033D0202.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/67da0bf8b1aa52fcc1257909004b2e42/$file/1SDC210033D0202.pdf)

- /10/ ABB. (2001) Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. Tekninen opas. Verkkojulkaisu. Viitattu 2.5.2013.  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$file/tekninen\\_opas\\_nro\\_6.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$file/tekninen_opas_nro_6.pdf)
- /11/ D1-2009 käsikirja rakennusten sähköasennuksista ISBN-10: 9522310042
- /12/ Esala H. Teoreettinen sähkötekniikka 1 – Vaihtovirta- ja magneettipiirit.
- /13/ Farin J., Peltonen L., Pykälä M. & Uski-Joutsenvuo S. (2009). Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä. Loppuraportti. Verkkojulkaisu. Viitattu 2.5.2013 <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/TAMU-loppuraportti.pdf>
- /14/ Hiekka, T. (2012). *Pienjännitteinen sähkönjakelukojeisto tasajänniteteuormille*. Diplomityö
- /15/ HP Data Sheet. DL360 G7. Verkkojulkaisu. Viitattu 3.5.2013  
<http://h18004.www1.hp.com/products/servers/4294pdfs/DL360G7579239xx1serv erdatasheet.pdf>
- /16/ Lepola T (2011). *Hakkuriteholähde*. Opetusmateriaali. Verkkojulkaisu. Viitattu 25.4.2013  
<http://users.metropolia.fi/~mikalem/SuLa/Projekti/Power%20supply.pdf>
- /17/ Sunrise SR Module. Esite. Verkkojulkaisu, viitattu 25.4.2013.  
<http://www.srsolartech.cn/UpFile/201208/2012080258688565.pdf>
- /18/ Suntekno. (2010). Aurinkopaneelimittaukset. Tekninen opas. Verkkojulkaisu. Viitattu 3.5.2013  
<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>
- /19/ Partanen J. Ym. *Tehoelektroniikka sähkönjakelussa – Pienjännitteinen tasasähkönjakelu*. ISBN 978-952-214-981-7